

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Antriebstechnik

IB 225 - 2006 A 02

F. Kost

**Einsatz einer Kulitesonde zur Messung
der Rotorabströmung im RGG**

Datum: Juni 2006

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. R. Mönig

**Vervielfältigung und Weitergabe dieser Unterlagen sowie Mitteilung ihres Inhalts an Dritte,
auch auszugsweise, nur mit Genehmigung ☒ des DLR-Gö.**



Strömung, Sonde, Pitotsonde, Sondeneichung, instationäre Strömung, Kulite-Druckmessung

Einsatz einer Kulitesonde zur Messung der Rotorabströmung im RGG

ÜBERSICHT

Eine kombinierte Gesamtdrucksonde, welche die gleichzeitige Messung des stationären und des zeitabhängigen Pitotdrucks erlaubt, wurde im Windkanal für Rotierende Gitter, Göttingen (RGG) im Abströmfeld einer Turbinenstufe eingesetzt. Zur Messung des stationären Drucks besitzt die Sonde ein Pitotröhrchen. Darunter ist ein Kulitesensor angebracht, der zur Messung des instationären Drucks dient. Durch Messung bei mindestens 3 Sondenwinkeln mit einem Winkelabstand von mindestens $\pm 30^\circ$ zur Strömungsrichtung kann man sowohl den Totaldruck, als auch die Machzahl und den 2D-Strömungswinkel (Umfangswinkel) zeitaufgelöst bestimmen.

Die Sonde wurde im Sondeneichkanal (SEG) im Machzahlbereich von 0,2 bis 0,9 und im Winkelbereich von $\pm 46^\circ$ kalibriert. Die sich ergebenden Drücke wurden als Druckbeiwerte bei konstanter Machzahl über dem Winkel aufgetragen und mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square-Fit) mit Polynomen approximiert. Die Koeffizienten der Druckbeiwert-Polynome wurden ihrerseits mit Polynomen über der Machzahl approximiert. Damit kann man diese Sonde zur Bestimmung des Abströmfeldes stromab eines Rotors einsetzen. Zu diesem Zweck wurde weiterhin eine Auswerteprozedur erstellt, die es erlaubt, iterativ aus gemessenen Sondendrücken bei drei Sondenwinkeln die relevanten Strömungsgrößen, Machzahl, Winkel und Gesamtdruck, ensemble-gemittelt zu erhalten. Einige Messergebnisse werden dargestellt und mit Ergebnissen einer stationären 3-Lochsonde verglichen.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Antriebstechnik
Abteilung Turbine

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	iv
1. Einleitung	1
2. Sondenaufbau	2
3. Durchführung und Auswertung der Eichung	4
4. Auswerteprozedur einer Messung bei drei Winkeln	10
4.1 Iterative Verbesserung der Lösung	10
4.2 Qualität der Auswerteprozedur	11
5. Einsatz der Kulitesonde im Abströmfeld einer Turbinenstufe	12
6. Zusammenfassung	23
Literatur	24
Abbildungsverzeichnis	25
Tabellenverzeichnis	25

Bezeichnungen

a, b, c, d	Polynom-Koeffizienten
C_p	Druckbeiwert
f	Funktion
Ma	Machzahl
p, p_0	statischer Druck, Gesamtdruck der Strömung
p_{01}	Gesamtdruck der Zuströmung, Vorkammerdruck
p_{0s}	stationärer Druck (Pitotdruck) der Sonde
p_{kul}	vom Kulitesensor gemessener Sondendruck
α	Winkel in Grad (Absolutsystem, 0 in axialer Richtung)
α_0	Strömungswinkel in Grad
β	Strömungswinkel in Grad (Relativsystem)
κ	Isentropenexponent

Indizes

s	Sonde
v	Absolutsystem
w	Relativsystem
$0, 1, 2, 3, 4, 5, i$	Indizes der Polynom-Koeffizienten

1. Einleitung

Am Windkanal für Rotierende Gitter, Göttingen (RGG) besteht ein dringender Bedarf für die Messung zeitaufgelöster Strömungsgrößen hinter dem Rotor. Ein mögliches Verfahren besteht darin, den Pitotdruck mit einer Pitotsonde mit Kulite-Drucksensor und die übrigen Messgrößen, Machzahl und Winkel mit Hilfe des Laser-2-Fokus-Gerätes (L2F) zu bestimmen. Dies hat sich bei Messungen hinter einem isolierten Rotor auch bei Überschallabströmung bewährt und liefert sehr zuverlässige Ergebnisse, wenn man nicht zu nahe am Rotoraustritt misst, wo man im Rotornachlauf zu wenig oder keine Seeding-Teilchen vorfindet. Allerdings ist die notwendigerweise lange Messzeit der L2F-Methode ein genereller Nachteil.

Insbesondere bei Messungen hinter einer Stufe, [1], hat sich gezeigt, dass die starke Verringerung der Seeding-Teilchen stromab des Rotors und die Verschmutzung des L2F-Fensters zu einer prohibitiv langen Messzeit führt und so die Zahl der Messpunkte stromab des Rotors beschränkt.

Die Absolutströmung im Abströmfeld einer Stufe ist generell subsonisch und deshalb für die Messung mit Sonden gut geeignet, allerdings müssen die Sonden in der Lage sein, die zeitabhängige Rotorabströmung zeitlich und räumlich gut aufzulösen. Die notwendige zeitliche Auflösung ergibt sich aus der Rotationsfrequenz des Rotors von beispielsweise 10000 Umdrehungen pro Minute, welche bei 60 Schaufeln auf dem Rotor zu einer Schaufelwechselfrequenz von 10 kHz führt. Um pro Schaufelteilung etwa 10 Abtastpunkte zu erhalten, ist folglich eine Abtastrate von 100 kHz, bzw. ein flacher Frequenzgang bis 50 kHz erforderlich.

Zunächst wurde überlegt, Hitzdrahtsonden zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit und des -winkels zu verwenden. Hinter dem Rotor ist allerdings ein räumlich und zeitlich stark inhomogenes Temperaturfeld vorhanden, bedingt durch die Arbeitsleistung des Fluids am Rotor und durch das Ausblasen von Kühlluft, was zu fehlerhaften Hitzdrahtmessungen führt. Außerdem kann man mit Hitzdrähten den Totaldruck nicht bestimmen, so dass auf jeden Fall zusätzlich eine zeitaufgelöste Totaldruckmessung notwendig wäre. Deshalb lag der Gedanke nahe, durch Messung bei mindestens 3 Sondenwinkeln mit einer Pitotsonde mit Kulite-Drucksensor sowohl den Totaldruck, als auch die Machzahl und den 2D-Strömungswinkel (Umfangswinkel) zeitaufgelöst zu bestimmen.

Kulitesensoren sind nicht beliebig klein lieferbar, daher war zu erwarten, dass die räumliche Auflösung geringer ist als bei L2F- oder Hitzdrahtmessungen. Die Messgenauigkeit ist sicher dem optischen und damit nicht-intrusivem L2F-Verfahren unterlegen, doch die Messzeit ist wesentlich kürzer als beim L2F-Verfahren, obwohl man bei der Verwendung der 'Einloch-Kulite-Sonde' nacheinander Messungen bei drei Winkeln durchführen muss.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem Einsatz der Kulitesonde im Abströmfeld einer Hochdruck-Turbinenstufe; die Eichung der Kulitesonde 1 im Sondeneichkanal und die Auswerteprozedur werden noch einmal kurz erläutert, obwohl die Eichung eines Vorgängermodells ausführlich in [2] dargestellt ist.

2. Sondenaufbau

Eine erste Kulitesonde des hier beschriebenen Typs wurde in [2] beschrieben. Da diese erste Sonde leider nach einigen Monaten defekt war, wurde eine neue Sonde mit etwas kleinerem Sondenkopf aufgebaut. Diese neue Kulitesonde 1 besteht, wie alle RGG-Sonden, aus einem langen Schaft von 690 mm Länge und überwiegend 6 mm Durchmesser, bis auf die letzten 30 mm der Länge, wo sich der Schaft auf ein Oval von 2,8 mm x 2,2 mm verjüngt (siehe Bild 1).

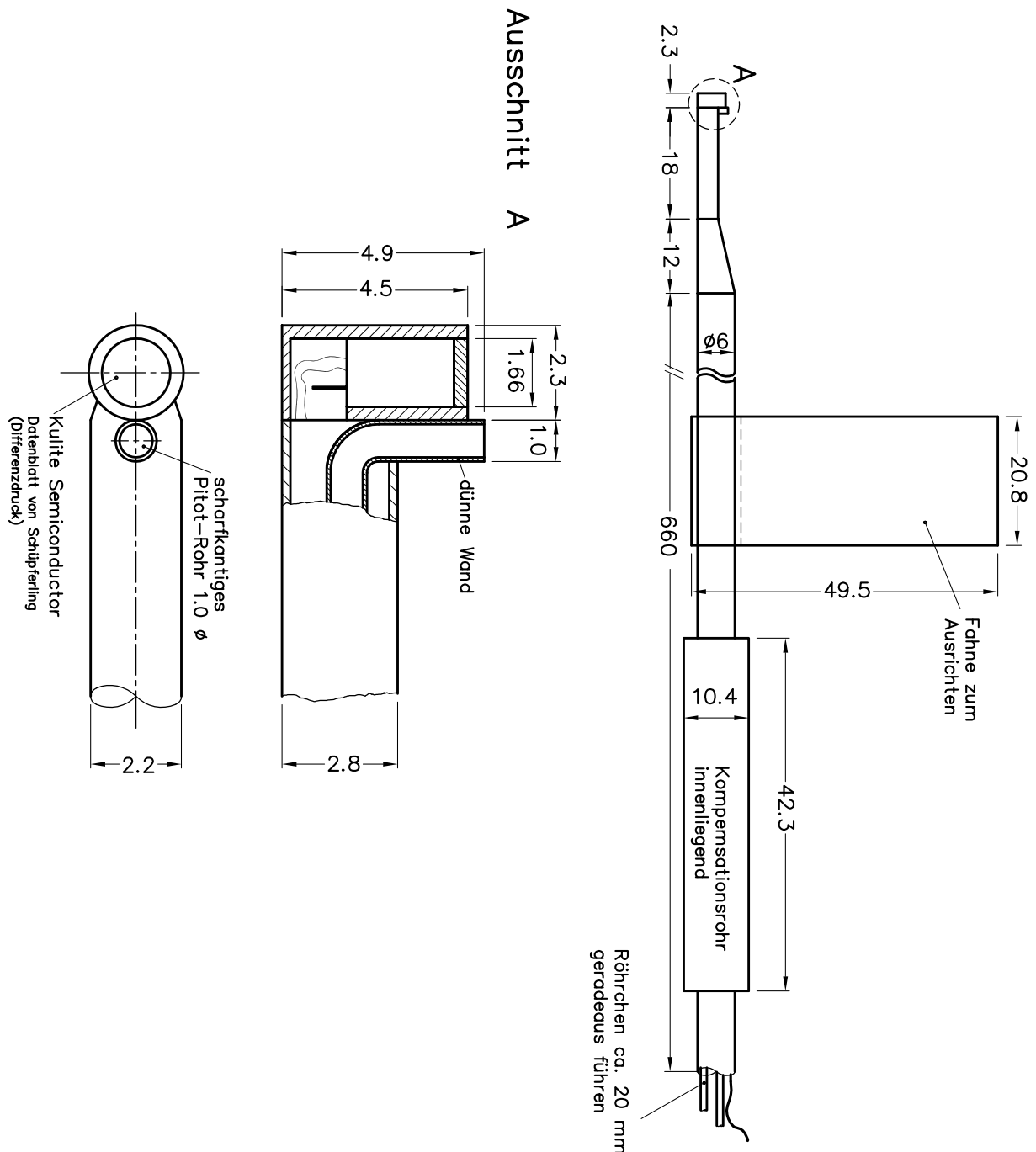


Bild 1: Aufbau der neuen Kulitesonde 1 (Juli 2005)

Am Ende des Schaftes sind zwei Pitotrohre rechtwinkelig zum Schaft angebracht, so dass ihre Öffnung zur Strömung hin gedreht werden kann. Im größeren Pitotrohr von 1,7 mm Innendurchmesser, 2,3 mm Außendurchmesser und 4,5 mm Länge ist der Kulitesensor eingebaut, der einen Durchmesser von 1,66 mm und mit 'Screen' (Abdeckung) eine Länge von etwa 3 mm besitzt. Der Kulitesensor ist vom differentiellen Typ mit einem Arbeitsbereich von ± 5 PSI (34,48 kPa) Differenzdruck, einem maximalen Differenzdruck von 10 PSI und einer nominellen Empfindlichkeit von 25 mV/PSI (Kulite Model No. XCS-77-062-5PSI-D). Das Referenzdruckröhrchen ist nach außen geführt, so dass ein beliebiger Referenzdruck benutzt werden könnte, üblicherweise wird jedoch der Druck vom stationären Pitotrohr als Referenz benutzt. Die 2,3 mm Außendurchmesser des Pitotrohrs mit eingebautem Kulitesensor lassen nur eine räumliche Auflösung von 11 Punkten für eine typische Rotorteilung (26 mm) erwarten. Dazu passt, dass die 50 kHz nutzbare Frequenz, die typischerweise ein Sensor vom oben beschriebenen Typ aufweist, eine Abtastrate von 100 kHz zulässt und damit 10 Abtastpunkte pro Rotorteilung bei 10 kHz Schaufelwechselfrequenz.

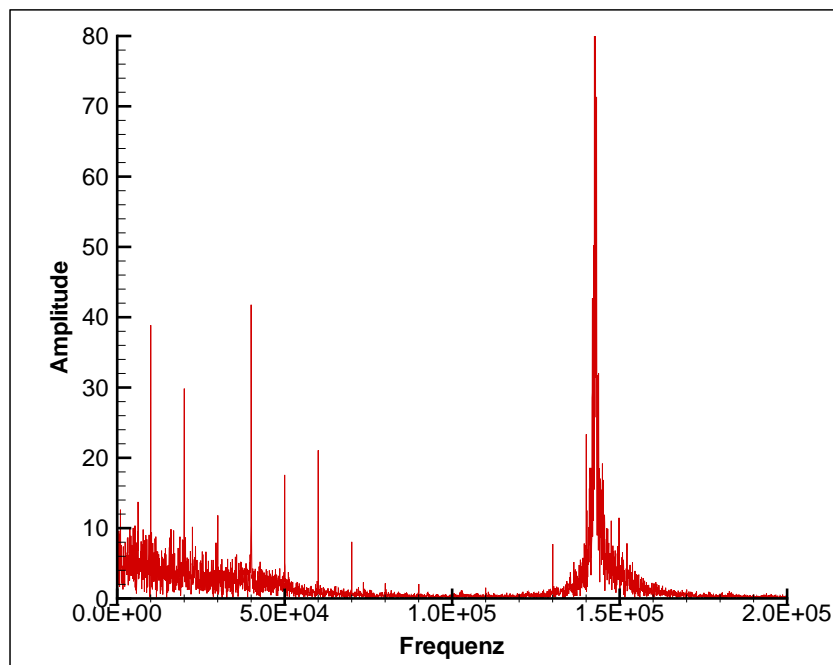


Bild 2: Frequenzanalyse einer Kulitemessung hinter einer Turbinenstufe; Schaufelwechselfrequenz 10 kHz

Die Frequenzanalyse einer Kulitemessung hinter einer Turbinenstufe unter Verwendung des Kulitesensors XCS-77-062-5PSI-D ist im Bild 2 dargestellt. Die im Datenblatt des Sensors angegebene Eigenfrequenz von 150 kHz ist als höchster Peak gut erkennbar. Andererseits scheint die Eigenfrequenz des Sensors den Frequenzbereich unter 100 kHz nicht zu beeinflussen, deshalb können die Peaks unterhalb 100 kHz der Strömung zugeordnet werden. Zwischen 70 und 100 kHz sind nur noch Peaks geringer Höhe zu erkennen, vermutlich aufgrund der Dämpfung, die durch den Screen des Sensors hervorgerufen wird. Die Schaufelwechselfrequenz des Turbinenrotors betrug 10 kHz; es sind die Frequenzen bis zur 9. Harmonischen zu erkennen, allerdings ab der 8. Harmonischen nur als Peaks geringer Höhe. Man kann aus dieser Frequenzanalyse schließen, dass der Sensor eine nutz-

bare Bandbreite von etwa 70 kHz aufweist, damit etwas höher, als die oben erwähnten 50 kHz, deshalb ist die Auflösung einer Rotorteilung doch hauptsächlich durch die Größe des Sondenkopfes vorbestimmt.

Das stationäre Pitotröhrchen befindet sich unmittelbar neben (radial oberhalb) des Kulitesensors (Abstand der Mittelpunkte der beiden Pitotrohre: 1,65 mm). Es ist scharfkantig und besitzt einen Außendurchmesser von 1,0 mm. Weiterhin ragt es 0,4 mm weiter in die Strömung als das Kuliterohr, um seinen winkelunabhängigen Bereich zu erhöhen.

3. Durchführung und Auswertung der Eichung

Die Eichung der Sonde wurde im Sondeneichkanal (SEG) durchgeführt — einer speziellen Messstrecke, die gebaut wurde, um Sonden im Machzahlbereich von 0,2 bis 1,8 und im Totaldruckbereich von 10 kPa bis 300 kPa zu kalibrieren. Eine genaue Beschreibung des SEG liegt in [3] vor oder im Internet unter http://www.dlr.de/at/institut/abteilungen/tu_home.

Obwohl die Sonde zwei Öffnungen (stationärer und instationärer Druck) besitzt, ist sie in ihrem Verhalten im Winkel- und Machzahlbereich sehr ähnlich einer zylindrischen Einlochsonde, wie sie in [4] beschrieben ist. Die Eichung wurde deshalb in ähnlicher Weise vorgenommen, wie in [4] beschrieben. Dort wurde auch schon vorgeschlagen, durch Messungen bei drei Sondenwinkeln die 2D-Strömungsgrößen, Gesamtdruck, Machzahl und Umfangswinkel zu bestimmen.

Zur Eichung wurde im SEG die Unterschalldüse eingebaut und die Sonde zentral im ausströmenden Freistrahle kurz hinter dem Düsenaustritt positioniert. Zunächst muss der Kulitesensor statisch kalibriert werden, d.h. die sich ergebende Spannung muss als Funktion des Differenzdruckes gemessen werden. Dies geschieht durch Anlegen des Atmosphärendrucks an das Referenzröhrchen und Absenken bzw. Erhöhen des internen Drucks in der geschlossenen Messstrecke des SEG. Damit wurde der Sensor über einen Bereich von ± 10 kPa kalibriert. Anschließend wurden die Daten einmal linear und dann mit Hilfe eines kubischen Polynoms approximiert. Die Kalibrierkurve ist in Bild 3 aufgetragen. Das punktsymmetrische kubische Polynom:

$$f(x) = 0.959060 + 3.2545307 \cdot x - 1.35520 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 \quad (1)$$

(x = Sensorspannung in V ; $f(x)$ = Differenzdruck in kPa)

wurde als Sensor-Eichpolynom verwendet. Bei einer aktuellen Messung muss diese Kalibration immer zeitnah zu den Messungen mit der Sonde wiederholt werden, um Effekte aufgrund zeitlicher Drift oder Temperatur-Drift des Sensors zu eliminieren.

Bei der eigentlichen Sondeneichung, ebenso wie bei der Messung im RGG wurde der Referenzdruck des Kulitesensors an das stationäre Pitotröhrchen angeschlossen, so dass der Kulitesensor immer nur die Abweichung vom stationären Pitotdruck anzeigt. Dies hat den Vorteil einer größerer Genauigkeit der Kulite-Druckmessung, da ein absolut messender Drucksensor für die Messungen im RGG den Bereich von 0 bis 150 kPa abdecken müsste. Außerdem führt es zu einer geringeren Empfindlichkeit der Kulite-Druckmessungen gegenüber Schwankungen des Nullpunktes ('Offset-Drift').

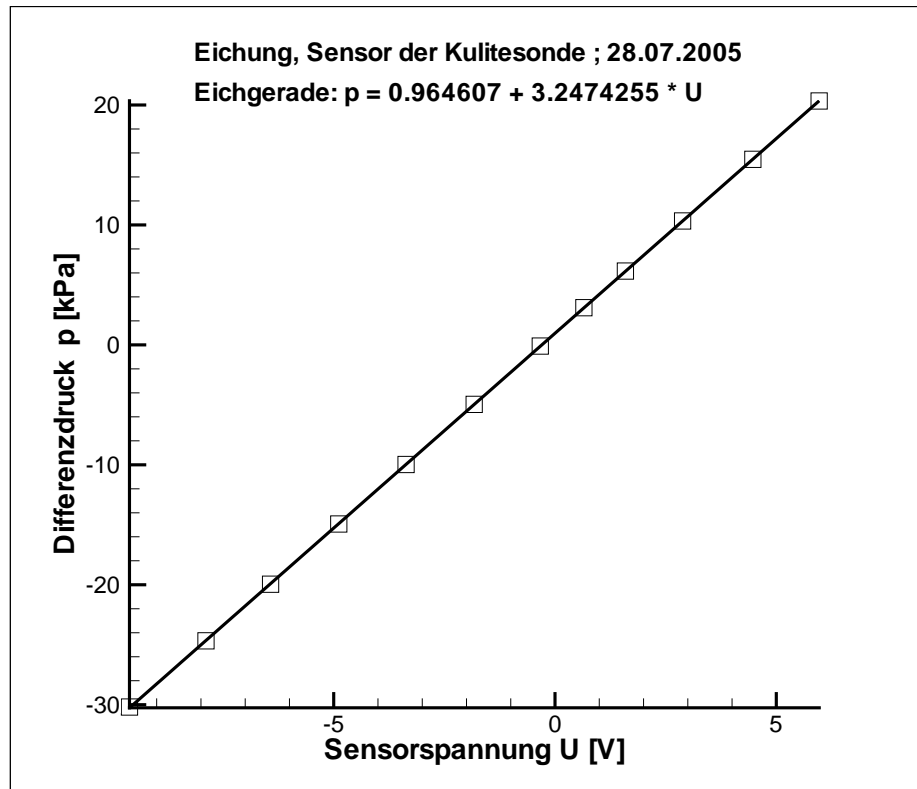


Bild 3: Beispiel einer statischen Eichung des Drucksensors im Kulite

Der Druck vom stationären Pitotröhrchen, p_{0s} , wurde an das PSI-Druckmesssystem angeschlossen und zwar differentiell zum Vorkammerdruck, p_{01} , so dass eine hohe Messgenauigkeit der maßgebenden Druckdifferenz, $p_{01} - p_{0s}$, gewährleistet ist.

Die vorliegende Eichung der Kulitesonde 1 wurde am 19.09.2005 im Sondeneichkanal (SEG) vorgenommen. Alle Eichmessungen wurden bei $p_{01} = 35$ kPa durchgeführt, der Machzahlbereich umfasst die Machzahlen von 0.2 bis 0.9, der Winkelbereich die Winkel von -46 bis +46 Grad. Als Vorkammerdruck wurde $p_{01} = 35$ kPa gewählt, da dies in etwa der Druckbereich in der Abströmung einer Stufe war, bei dem die Sonde 2005 am RGG eingesetzt wurde.

Der Winkel, der bei der Kulitesonde einer Drehung um den Schaft entspricht, ist zur Zeit im SEG nur ungenau zu bewerkstelligen ($\pm 5^\circ$), weil die Einspannung der Sonde nur grob nach Augenmaß entsprechend der Symmetrie des Sondenkopfes vorgenommen werden kann. Die Ausrichtung der Sonde wird daher üblicherweise nach einer ersten Messung so korrigiert, dass der Winkel Null mit der aerodynamischen Nullrichtung der Sonde und damit mit der Symmetrieachse des Sondenkopfes übereinstimmt. Um den aerodynamischen Winkel Null zu erhalten musste der eingestellte Winkel um $+0,45^\circ$ erhöht werden. Danach war der stationäre Pitotdruck ' p_{0s} ' symmetrisch zu $\alpha = 0^\circ$, aber der Kulitedruck ' p_{kul} ' war weiterhin leicht asymmetrisch. Dies wurde bei der Eichauswertung berücksichtigt, indem für die Approximation von p_{0s} über α nur achsen-symmetrische Funktionen verwendet wurden, für p_{kul} wurden allgemeine Funktionen zugelassen.

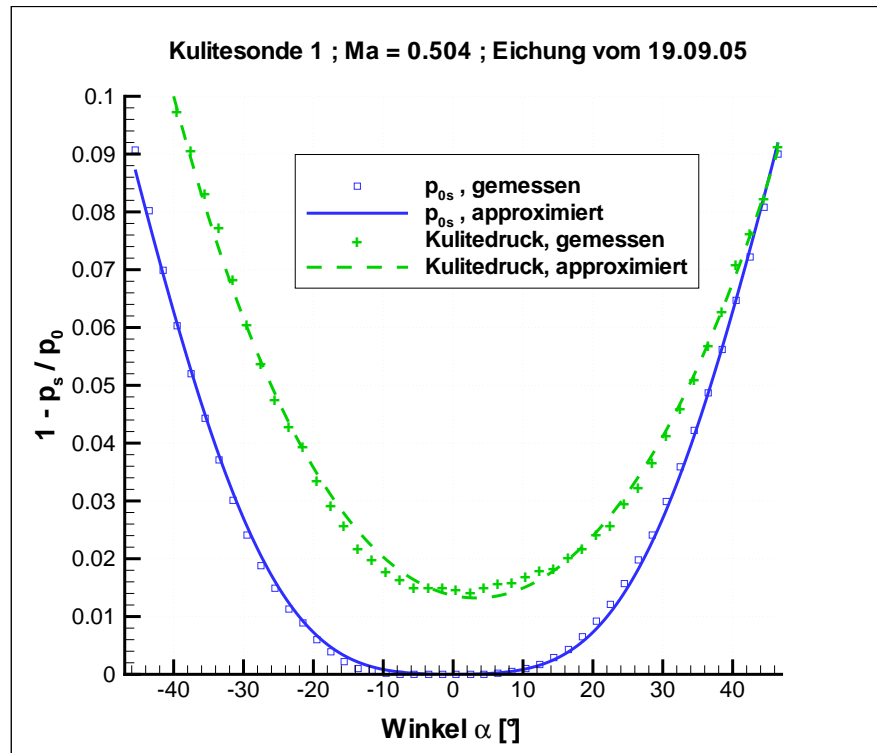


Bild 4: Ein Ergebnis der Sondeneichung bei $Ma = 0,50$

Aus den gemessenen Sondendrücken wurde jeweils der folgende Druckbeiwert gebildet:

$$Cp = (1 - p_s) / p_0 \quad (2)$$

wobei p_s gleich p_{0s} oder gleich p_{kul} gesetzt wurde und $p_0 = p_{01}$.

Im Bild 4 ist der Druckbeiwert Cp über dem Winkel α für die Machzahl $Ma = 0,50$ bei einem Vorkammerdruck $p_{01} = 35 \text{ kPa}$ aufgetragen. Die Druckbeiwerte wurden bei einer konstanten Machzahl als Funktion des Winkels mit Polynomen approximiert. In das Bild 4 sind auch die approximierenden Funktionen mit eingezeichnet.

Dabei konnte für p_{0s} ein vollkommen symmetrisches Polynom 8.Grades gewählt werden:

$$Cp(p_{0s}) = a_1 \cdot \alpha^2 + a_2 \cdot \alpha^4 + a_3 \cdot \alpha^6 + a_4 \cdot \alpha^8 \quad (3)$$

Wegen der besonders wichtigen Anpassung im Bereich kleiner Winkel (wichtig zur genauen Ermittlung des Totaldrucks) kann man zusätzlich den Unempfindlichkeitsbereich der Totaldruckmessung angeben:

$$Cp(p_{0s}) = 0 \quad \text{für } |\alpha| < 8^\circ \quad (4)$$

Wie Bild 4 zeigt, kann der Druckbeiwert für p_{0s} über dem Winkel α mit guter Genauigkeit durch ein Approximationspolynom mit 4 Koeffizienten angenähert werden.

Der Druckbeiwert des Kulites muss als unsymmetrisches Polynom 4.Grades approximiert werden, entsprechend mit 5 Koeffizienten:

$$Cp(p_{kul}) = d_1 + d_2 \cdot \alpha + d_3 \cdot \alpha^2 + d_4 \cdot \alpha^3 + d_5 \cdot \alpha^4 \quad (5)$$

Der Unempfindlichkeitsbereich der Kulite-Totaldruckmessung ist wesentlich geringer als beim scharfkantigen Pitotröhrchen der stationären Messung, so dass es sich nicht lohnt, ihn anzugeben. Weiterhin ist der Druckbeiwert des Kulites nicht Null bei $\alpha = 0^\circ$, deshalb ist ein konstanter Koeffizient (d_1) zur Approximation erforderlich. Bei Fehlen einer zentralen Bohrung wird diese Abweichung von der Nulllinie hervorgerufen durch den bündigen Einbau des Kulitesensors in das Pitotrohr und durch die konzentrische Anordnung der Bohrungen im 'Screen' des Kulitesensors, [5].

Als Beispiel für Eichergebnisse bei verschiedenen Machzahlen sind im Bild 5 Druckbeiwerte C_p des stationären Drucks und im Bild 6 Druckbeiwerte des Kulitedrucks aufgetragen. Der Druckbeiwert des stationären Pitotrohrs ist Null bei allen Machzahlen für Winkel $|\alpha| < 8^\circ$. Man erkennt weiterhin, dass die Krümmung der Eichkurven stark von der Machzahl abhängig ist und deshalb aus einer Messung bei mindestens 3 Winkeln auch die Machzahl der Strömung gut ermittelt werden kann.

Eichmessungen bei verschiedenen Vorkammerdrücken (Reynoldszahlen) wurden bei dieser Sonde nicht vorgenommen, im Gegensatz zu den in [2] dokumentierten Eichmessungen. In [2] wurde gezeigt, dass nur ein Unterschied im konstanten Glied des Druckbeiwertes $C_p(p_{kul})$ auftritt. Da die 2005 durchgeführten Messungen im Bereich von 35 kPa stattfanden, ist die vorliegende Eichung in Ordnung.

Die Polynomkoeffizienten der approximierten Druckbeiwerte nach Gleichungen (3) und (5) sind in den folgenden Tabellen 1 und 2, aufgelistet. Die in den Tabellen 1 und 2 aufgeführten Koeffizienten wurden ihrerseits wiederum als Funktionen der Machzahl approximiert.

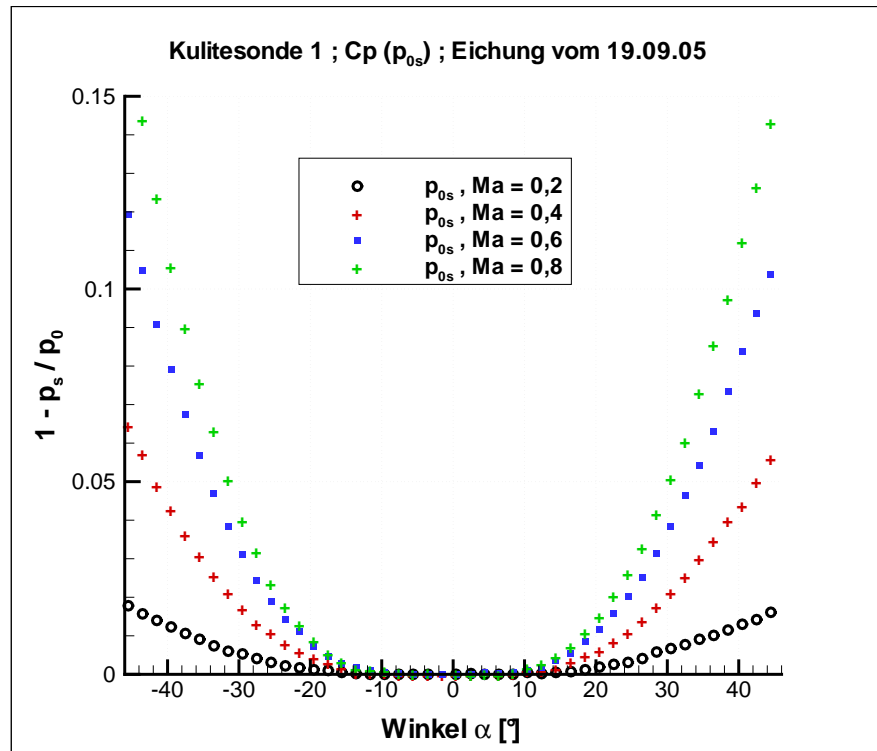


Bild 5: Druckbeiwert des stationären Pitotrohrs bei verschiedenen Machzahlen

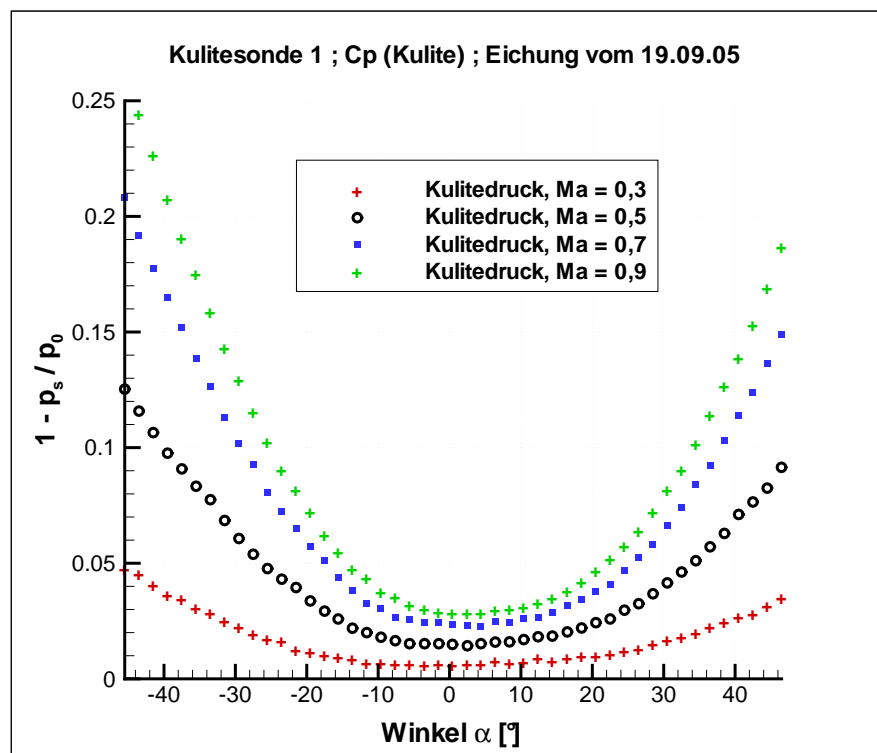


Bild 6: Druckbeiwert des Kulites bei verschiedenen Machzahlen

Tabelle 1: Kulitesonde 1 ; Eichkoeffizienten der Sonden-Eichung vom 19.09.2005 ; Polynomkoeffizienten des stationären Pitotdrucks p_{0s} als Funktion des Winkels α nach Gleichung (3) ; $p_{01} = 35$ kPa

```
# Kulitesonde 1 ; Eichkoeffizienten der Sonden-Eichung vom 19.09.2005 ;
#           Best Fit für  $C_{p0s} = 1 - p_{0s}/p_{01}$  ( $p_{0s} = p_{sonde}$ )
#           | Polynomkoeffizienten des stationären Pitotrohrs (4 Koeffizienten)
#  Ma  |  x**2      x**4      x**6      x**8
0.209 -2.56737E-07  1.23217E-08 -6.54448E-12  1.26188E-15
0.302  1.06505E-06  1.93363E-08 -8.38525E-12  1.35540E-15
0.404  3.81870E-06  2.58478E-08 -7.97255E-12  6.87278E-16
0.504  4.69457E-06  3.88648E-08 -1.34393E-11  1.64798E-15
0.552  4.70302E-06  4.48389E-08 -1.46497E-11  1.55425E-15
0.603  6.58897E-06  4.64877E-08 -1.33675E-11  1.03504E-15
0.703  4.84527E-06  6.19100E-08 -2.07755E-11  2.60381E-15
0.800  5.78002E-06  6.61369E-08 -2.04825E-11  2.33529E-15
0.903  5.95953E-06  7.07826E-08 -2.24631E-11  2.82132E-15
```

Tabelle 2: Kulitesonde 1 ; Eichkoeffizienten der Sonden-Eichung vom 19.09.2005 ; Polynomkoeffizienten des Kulitedrucks p_{kul} als Funktion des Winkels α nach Gleichung (5); $p_{01} = 35$ kPa

```
# Kulitesonde 1 ; Eichkoeffizienten der Sonden-Eichung vom 19.09.2005
#            $C_{pkul} = 1 - p_{kul}/p_{01}$ 
#           | Polynomkoeffizienten des Kulites ( 5 Koeffizienten )
#  Ma  |  1      x      x**2      x**3      x**4
0.209  3.84721E-03  3.14875E-05  5.31624E-06 -5.41570E-08  1.166838E-09
0.302  6.03514E-03 -3.62881E-05  1.34825E-05 -7.00738E-08  1.714183E-09
0.404  9.41098E-03 -1.10770E-04  2.52171E-05 -1.11447E-07  2.816521E-09
0.504  1.36419E-02 -2.59320E-04  3.94421E-05 -9.06141E-08  2.777636E-09
0.552  1.53882E-02 -3.08995E-04  4.72957E-05 -1.02817E-07  2.700851E-09
0.603  1.76394E-02 -3.90371E-04  5.47826E-05 -1.06846E-07  2.734085E-09
0.703  2.16500E-02 -5.20624E-04  6.61392E-05 -1.17167E-07  4.239583E-09
0.800  2.51800E-02 -6.21348E-04  7.41382E-05 -1.33889E-07  5.877086E-09
0.903  2.72268E-02 -6.83639E-04  8.10904E-05 -1.62052E-07  6.517168E-09
```

4. Auswerteprozedur einer Messung bei drei Winkeln

Um die Strömungsgrößen: Totaldruck, Machzahl und Umfangswinkel, mit Hilfe einer Pitotsonde zu ermitteln, braucht man mindestens Messungen bei 3 Sondenwinkeln beim gleichen Strömungszustand. Im folgenden wird davon ausgegangen, dass diese Druckmessungen bei drei Winkeln vorliegen. Die Aufgabe besteht nun darin, aus diesen drei Messpunkten (Sondendruck, Winkel), mit Hilfe der oben ermittelten Eichkoeffizienten, die drei interessierenden Strömungsgrößen zu ermitteln. Eine ausführliche Beschreibung der Auswerteprozedur mit Auflistung der benutzten FORTRAN-Programme liegt in [2] vor.

Eine erste grobe Approximation erhält man durch die Anpassung einer Parabel an die 3 Messpunkte ($p_{s,i}$; $\alpha_{s,i}$; $i=1,3$). Als Parabelgleichung wird folgende Form vorgegeben:

$$p_s = b_0 + b_1 \cdot (\alpha_s - \alpha_0)^2 \quad (6)$$

Als Ergebnis erhält man den Scheitelpunkt der Parabel (b_0 , α_0) und den quadratischen Koeffizienten b_1 . Der Koeffizient b_0 ist eine erste Näherung für den Totaldruck p_0 der Strömung und α_0 ist eine erste Näherung für den Winkel der Strömung. Die weitere Auswertung ergab, dass beide Größen schon recht brauchbare Näherungen darstellen. Eine erste Näherung für die Machzahl gewinnt man aus dem Koeffizienten der 2.Ableitung b_1 . Die damit vorliegenden groben Näherungswerte der gesuchten Strömungsgrößen werden als Startwerte zur iterativen Verbesserung der Lösung benötigt.

4.1 Iterative Verbesserung der Lösung

Gesamtdruck p_0

Mit Hilfe der vorliegenden Näherung des Strömungswinkels α_0 kann man den Messpunkt ermitteln, der am nächsten zu α_0 liegt. Nehme an, es sei Messpunkt 1, für den gilt also: $|\alpha_1 - \alpha_0| = \text{Minimum}$. Dann erhält man aus $p_{s,1}$ unter Benutzung der vorliegenden Näherung für die Machzahl folgendermaßen eine verbesserte Lösung für den Gesamtdruck:

$$p_0 = \frac{p_{s,1}}{1 - Cp(Ma, (\alpha_1 - \alpha_0))} \quad (7)$$

Dabei wird Cp unter Benutzung der Tabelle der Eichkoeffizienten berechnet.

Während die Sondenmessung, deren Winkel nahe am Strömungswinkel liegt, zur Bestimmung des Gesamtdruckes genutzt wird, können die beiden übrigen Messpunkte ($i=2,3$) zur iterativen Verbesserung sowohl des Strömungswinkels, als auch der Machzahl genutzt werden.

Strömungswinkel α_0

Bei fester Machzahl, Ma, wird eine neue Näherung des Strömungswinkels α_0 ermittelt. Dazu wird die Nullstelle folgender Funktion gesucht:

$$f(\alpha_0) = Cp(Ma, (\alpha_i - \alpha_0)) + p_{s,i}/p_0 - 1. \quad (8)$$

Die Nullstelle wird mit Hilfe des Newton-Verfahrens ermittelt, einer besonders schnellen Iterationsmethode [2, 6].

Machzahl Ma

Bei festem Strömungswinkel, α_0 , wird eine neue Näherung der Machzahl ermittelt. Dazu wird die Nullstelle folgender Funktion gesucht:

$$f(Ma) = Cp(Ma, (\alpha_i - \alpha_0)) + p_{s,i}/p_0 - 1. \quad (9)$$

Hierbei wäre es äußerst umständlich, auch das Newton-Verfahren zu benutzen, da man hierzu erst die Ableitung der Funktion $f(Ma)$ nach Ma berechnen müsste. Deshalb wurde das Verfahren 'Regula falsi' zur Nullstellenbestimmung verwendet [2, 6].

4.2 Qualität der Auswerteprozedur

Die bisher beschriebenen 3 Schritte zur iterativen Verbesserung der Lösung für Gesamtdruck, Strömungswinkel und Machzahl wurden zweimal nacheinander wiederholt, danach konnte man keine weitere Verbesserung der Lösung feststellen.

Die Auswerteverfahren von stationärem Pitotdruck und Kulitedruck unterscheiden sich nur durch die verwendeten Approximationspolynome des Druckbeiwertes C_p . Bei der Auswertung der Kulitedrücke konnten allerdings als erste Näherung die Ergebnisse für die stationären Strömungsgrößen verwendet werden.

Um die Zuverlässigkeit und die Grenzen der Auswerteprozedur zu testen, wurden den Eichmessungen bei jeder gemessenenen Machzahl 16 Tripel von Messpunkten bei drei verschiedenen Winkeln $((p_{s,i}; \alpha_{s,i}), i=1,3)$ entnommen und als Messwerte der Auswerteprozedur zugeführt. Damit konnte man erkennen, wie gut die Auswerteprozedur die ursprünglichen Strömungsgrößen aus drei Messpunkten reproduzieren kann.

Man konnte folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Wenn ein Messpunkt im Bereich $\pm 12^\circ$ um den Strömungswinkel herum vorliegt, dann kann der stationäre Totaldruck mit einer relativen Genauigkeit von 0,1% bestimmt werden. Der Totaldruck vom Kulitesensor kann mit einer relativen Genauigkeit von 0,2% bestimmt werden, vorbehaltlich des Reynoldszahleinflusses. Da bei drei Winkeln immer ein Messpunkt nahe genug am Strömungswinkel liegen sollte, können die Totaldrücke auch immer mit der erwähnten Genauigkeit ermittelt werden.
- Wenn die zwei weiteren Messpunkte den Strömungswinkel großzügig einschließen und dabei einen gegenseitigen Abstand von mindestens 60° aufweisen, dann kann die Machzahl, sowohl stationär als auch instationär, absolut auf $\pm 0,02$ bestimmt werden, d.h. die relative Genauigkeit sinkt mit abnehmender Machzahl. Eine Ausnahme bilden Machzahlen $> 0,85$, wo auch die absolute Genauigkeit nur noch einen Wert von $\pm 0,03$ aufweist.
- Im Fall der Messpunktverteilung wie oben, kann der Strömungswinkel, sowohl stationär als auch instationär, absolut auf $\pm 0,5^\circ$ bestimmt werden, allerdings nicht für Machzahlen $< 0,45$, wo der Winkelfehler auf $\pm 0,8^\circ$ ansteigt.

5. Einsatz der Kulitesonde im Abströmfeld einer Turbinenstufe

Die Messungen mit der Kulitesonde wurden im Windkanal für Rotierende Gitter (RGG) [7] im Abströmfeld des Rotors einer Hochdruckturbinenstufe (siehe Bild 7) vorgenommen. Dabei kann auch die Lage der Sonde relativ zum Stator durch Drehen des Stators variiert werden.

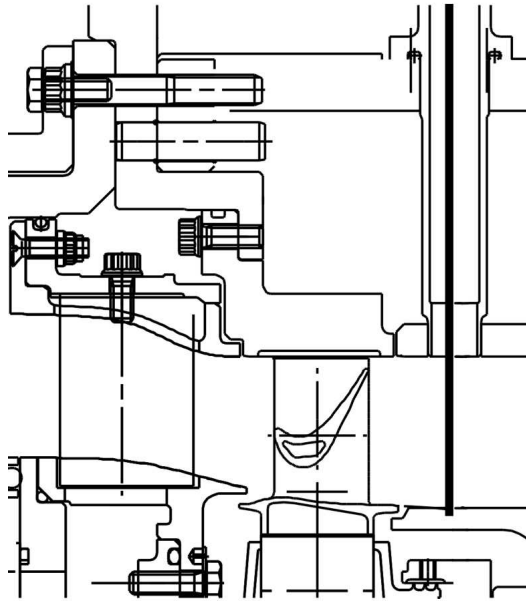


Bild 7: Turbinenstufe mit eingezeichneter Sonden-Messebene

Zuerst musste jedoch die Kulitesonde in der Zuströmung zur Turbinenstufe eingebaut werden, um die Sonde auf Strömungsrichtung Null auszurichten. In der Zuströmung ist die Strömungsrichtung axial und der Sondenkopf kann auf Winkel Null ausgerichtet werden, indem man die Symmetrie der Eichkurve des stationären Pitotröhrchens ausnutzt. Da allerdings die Zuströmungsgeschwindigkeit zur Stufe sehr klein war, war diese Art der Ausrichtung nicht sehr genau, so dass allein hieraus ein systematischer Winkelfehler von 1° resultieren kann.

Danach wurde die Kulitesonde im Abströmfeld des Rotors eingebaut (Messebene siehe Bild 7) und der Kulitesensor statisch kalibriert. Dies geschah durch Anlegen des Atmosphärendrucks an das Referenzröhrchen und Absenken bzw. Erhöhen des internen Drucks in der geschlossenen Messstrecke des RGG. Die sich ergebende Spannung am Sensor wurde als Funktion des Differenzdruckes gemessen. Anschließend wurden die Daten mit Hilfe eines kubischen Polynoms approximiert (siehe Bild 3). Damit wurde der Sensor über einen Bereich von ± 10 kPa kalibriert.

Zur Messung in der Strömung wird der Referenzdruck des Kulitesensors an das stationäre Pitotröhrchen angeschlossen, so dass der Kulitesensor immer nur die Abweichung vom stationären Pitotdruck anzeigt. Bei der Auswertung wird einfach der gleichzeitig gemessene stationäre Druck zum instationären Druck addiert, um Absolutwerte zu erhalten. Die

stationären Drücke am RGG werden alle mit einem PSI-System erfasst, welches die Drücke mit einem auf den Messbereich bezogenen relativen Fehler $< 6 \cdot 10^{-4}$ misst.

Im folgenden sind Ergebnisse beim Stufen-Druckverhältnis 2,91 und der Rotordrehzahl 10000 rpm dargestellt. Bei 4 Statorstellungen ($0^\circ, -3^\circ, -6^\circ, -9^\circ$) und 8 radialen Positionen wurden jeweils Messungen bei 3 Winkeln der Kulitesonde (z.B. $16^\circ, -20^\circ, 50^\circ$) vorgenommen. Dabei wurde jeweils pro Winkel ein Datensatz der stationären Größen aufgenommen und ein instationärer Datensatz. Die zeitaufgelösten Kulite-Spannungswerte wurden mit einer Abtastrate von 500 K/s aufgenommen und dabei jeweils 10000 Punkte pro Messung abgespeichert, das waren 3,333 Rotor-Umdrehungen bzw. genau 200 Rotor-Teilungen bei Drehzahl 10000. Jede zeitaufgelöste Messung wird bei einem Triggerpuls gestartet, der einmal pro Rotorumdrehung auftritt. Der Messmodus war entweder transient oder 'repetitiv', wobei beim letzteren das Messsignal vom Erfassungsgerät über viele Rotorumdrehungen gemittelt wird und damit automatisch alle Frequenzen herausgefiltert werden, die kein Vielfaches der Umdrehungsfrequenz sind. Damit hat man gleichzeitig eine sogenannte 'Ensemble-Mittelung' erzielt. In Bild 8 ist ein Ergebnis der 'Ensemble-Mittelung' mit dem 'Repetitiv-Modus' dargestellt. Von den aufgenommenen 200 Rorteilungen sind die ersten 10 Teilungen ab Triggerimpuls abgebildet. Wie erwartet, ist eine gute Periodizität der Rotorteilungen zu erkennen.

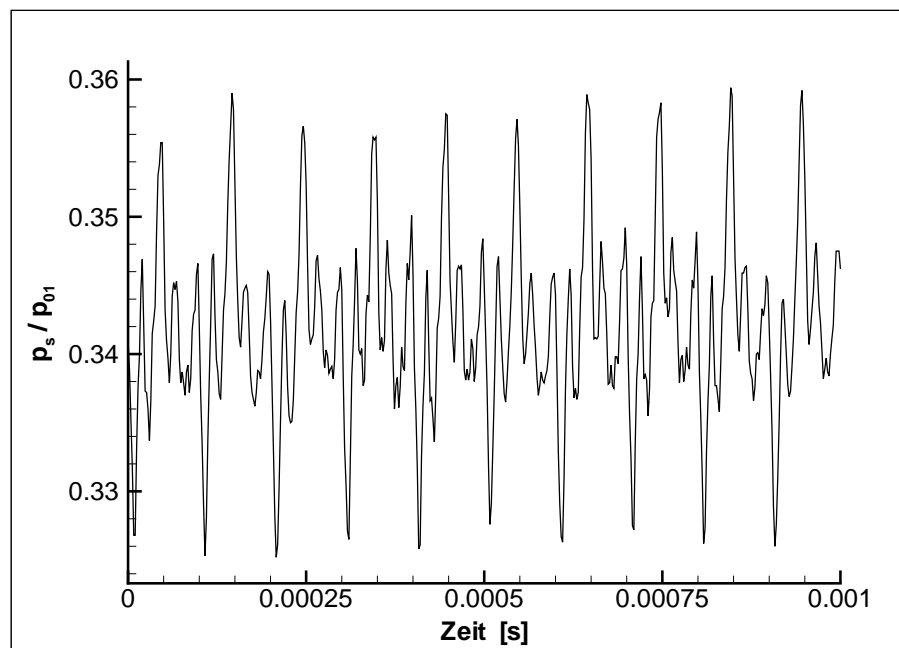


Bild 8: Mit dem Kulite gemessener Druck über 10 Teilungen aufgetragen

Die 200 Rotorteilungen wurden anschließend noch einmal 'ensemble-gemittelt', indem sie alle auf die erste Teilung abgebildet und gemittelt wurden. Nimmt man das Messsignal im transienten Modus auf, wird das Zeitsignal ohne Mittelung über 200 Rotorteilungen aufgenommen. Weil das transiente Signal jedoch durch die Eigenfrequenz des Kulites stark verrauscht war, musste man anschließend eine Filterung vornehmen. Wegen der Abtastrate von 500 K/s genügte eine 3-Punkt-Glättung. Man führte anschließend die gleiche 'Ensemble-Mittelung' von 200 auf eine Teilung durch. Nach der 'Ensemble-Mittelung' lieferten die beiden Messmodi Ergebnisse mit nur vernachlässigbaren Abweichungen.

Da die Messungen zum gleichen Strömungszustand bei den 3 verschiedenen Sondenwinkeln jeweils beim festen Triggerzeitpunkt gestartet wurden, sind die instationären Drücke bei den verschiedenen Winkeln, relativ zum Rotor zeitlich synchron und man kann bei der Auswertung den k-ten Punkt beim Winkel 1 den k-ten Punkten bei den Winkeln 2 und 3 zuordnen.

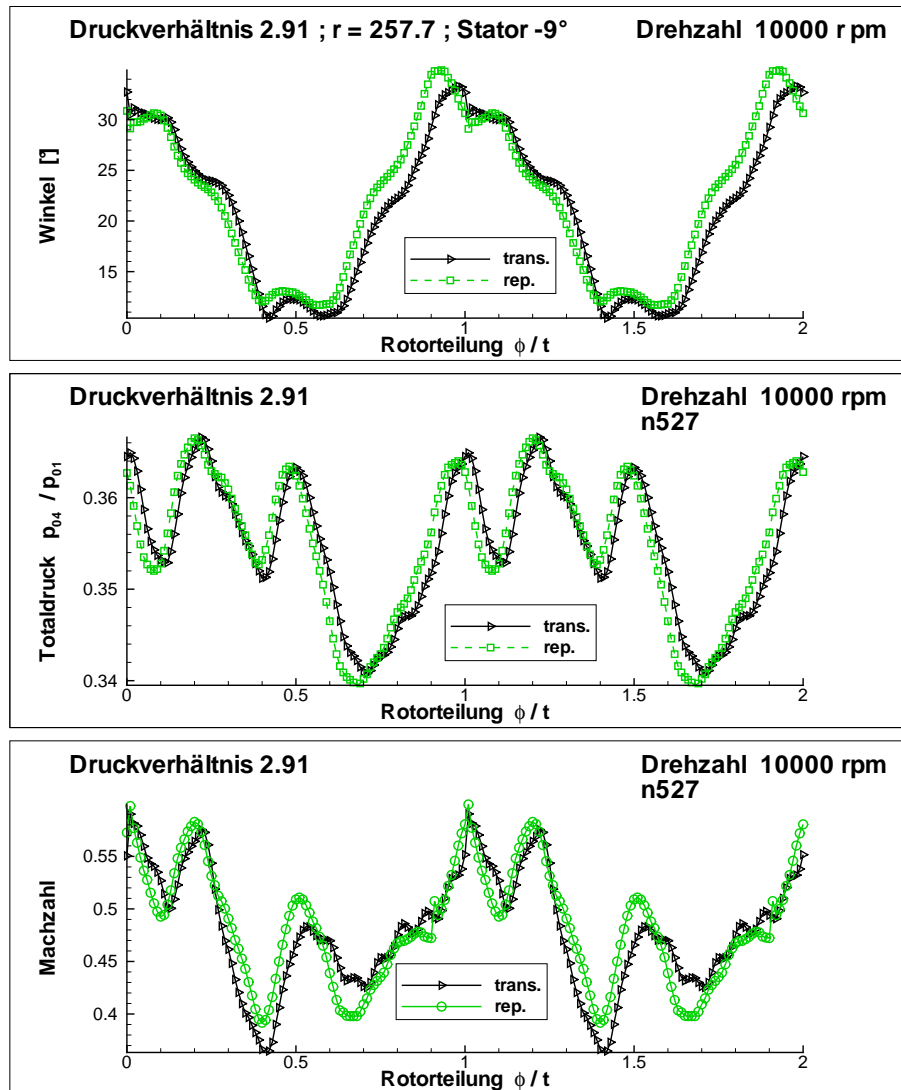


Bild 9: Vergleich zweier Messergebnisse beim gleichen Strömungszustand

Die Reproduzierbarkeit einer ausgewerteten Kulitemessung wird in Bild 9 demonstriert. Dargestellt sind der zeitaufgelöste Winkel-, Gesamtdruck- und Machzahlverlauf über 2 Rotorteilungen. Wie erwähnt, sind alle 200 gemessenen Teilungen auf eine Rotorteilung reduziert, nur aus Darstellungsgründen ist die eine Teilung wieder auf zwei erweitert worden. Offensichtlich wird der Totaldruck am besten reproduziert, die erkennbare Abweichung ist am ehesten durch eine geringe Variation des Triggerzeitpunktes zu erklären. Dies zeigt, dass alle Elemente des Messsystems exakt ausgelegt werden müssen, um den Messfehler gering zu halten. Die Winkel weichen maximal 3° voneinander ab, das ist deutlich mehr als allein aufgrund der Eichung zu erwarten (s. oben), aber auch hier ist ein Teil

der Abweichung auf den Trigger zurück zu führen. Das Gleiche gilt für die Machzahl. Im ganzen betrachtet ist die Reproduzierbarkeit zufrieden stellend.

Am Anfang dieses Berichts wurde von einer räumlichen (und zeitlichen) Auflösung von etwa 11 Punkten pro Teilung ausgegangen. Betrachtet man die Details in Bild 9 so scheint dies zu zutreffen, möglicherweise ist die Auflösung sogar noch geringfügig besser als erwartet.

Als Sondenergebnis erhält immer man sowohl einen stationären Wert, als auch eine zeitaufgelöste Kurve, die Ergebnisse für eine oder mehrere Rotorteilungen darstellt. Mittelt man über die Rotorteilung (Zeit-Mittelung) dann müssten die Ergebnisse übereinstimmen, wenn die implizite Zeitmittelung beim Messvorgang der stationären Sonde übereinstimmt mit der expliziten Zeitmittelung, welche man an der zeitaufgelösten Kurve vornimmt. Im Bild 10 sind stationäre Ergebnisse, aufgetragen über der Schaufelhöhe mit zeitgemittelten Ergebnissen verglichen. Bei der Darstellung wurde die radiale Verschiebung zwischen stationärer Pitotöffnung und Kulitesensor berücksichtigt. Man erkennt eine meist befriedigende Übereinstimmung, wobei wie schon beim Auswerteprogramm diskutiert, der Gesamtdruck die geringsten Abweichungen aufweist. Dabei sind sowohl Messergebnisse im kanalfesten Absolutsystem, als auch im rotorfesten Relativsystem dargestellt. Interessant ist, dass der Peak des Absolutwinkels, α , bei Schaufelhöhe 0,9 sich nicht beim Relativwinkel, β , wiederfindet, sondern als Einbruch bei der Relativ-Machzahl.

(Bemerkung: Winkel ist Null in axialer Richtung; Winkel ist positiv in Richtung der Rotordrehung, d.h. je negativer der Relativwinkel des Rotors, desto größer die Umlenkung).

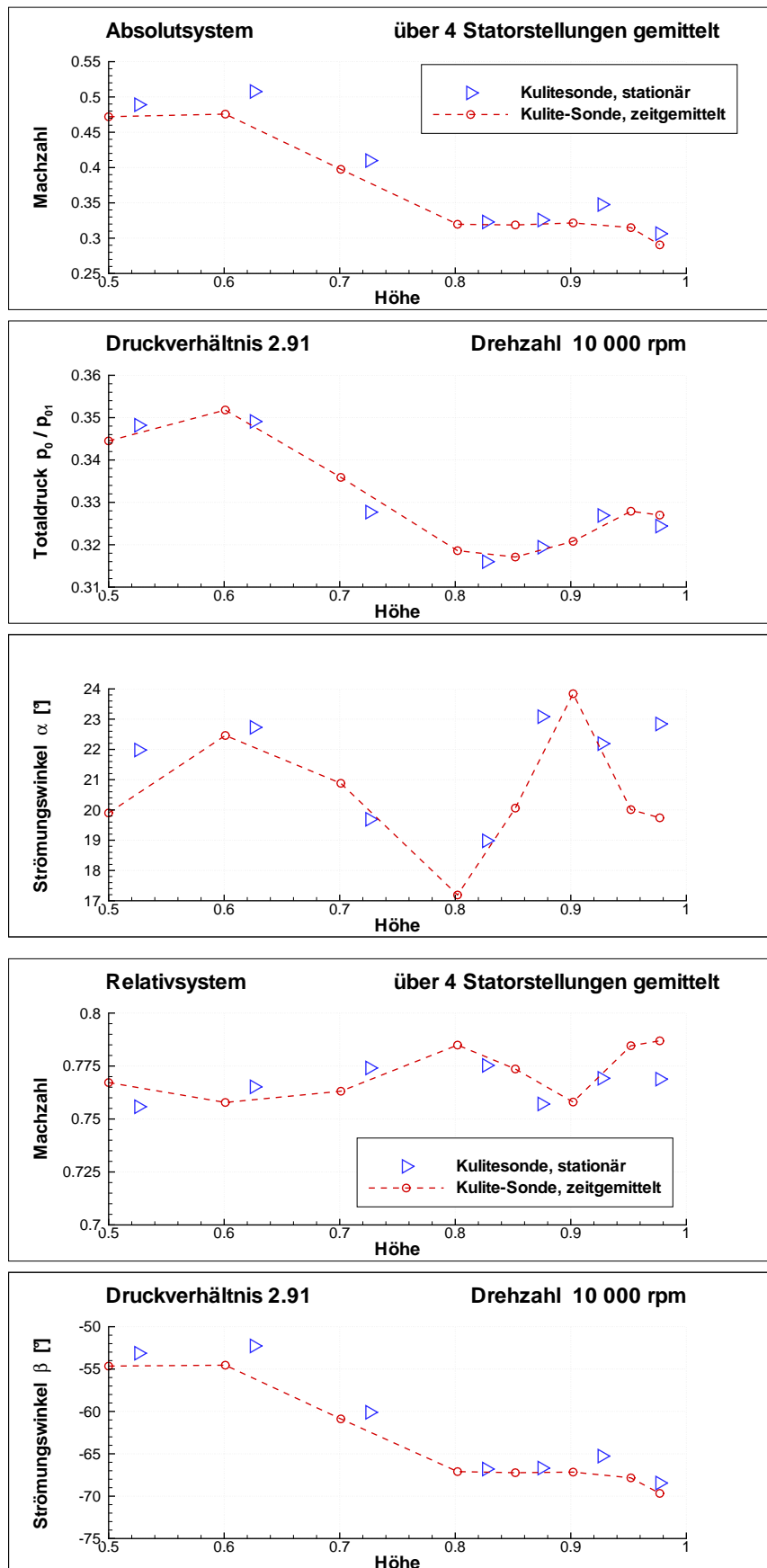


Bild 10: Vergleich stationärer Ergebnisse mit zeitgemittelten

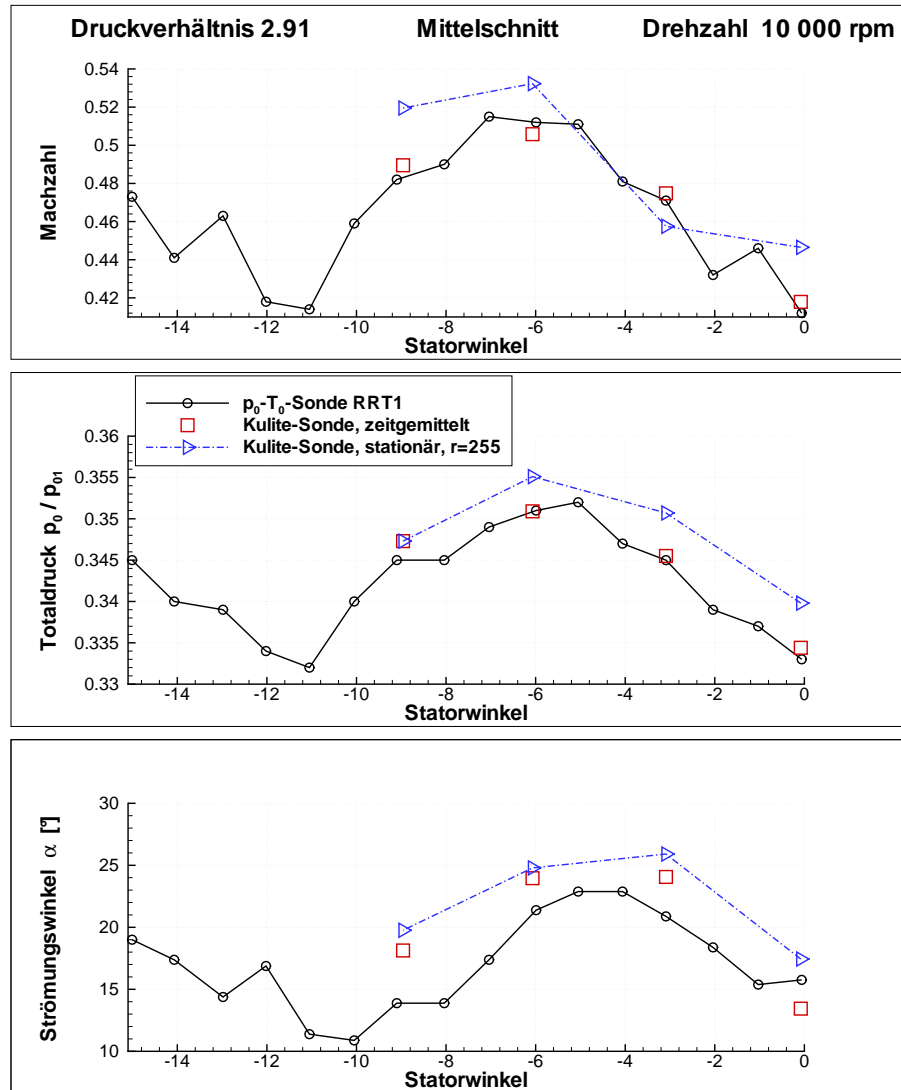


Bild 11: Vergleich der Messergebnisse von Kulitesonde und der stationären p_0T_0 -Sonde

Im Mittelschnitt (Schaufelhöhe 50%) konnte ein Vergleich der zeitgemittelten Ergebnisse der Kulitesonde mit der stationären sogenannten p_0T_0 -Sonde vorgenommen werden (siehe [8]). Die p_0T_0 -Sonde weist ein zentrales Pitotröhrchen, flankiert von zwei schräg abgeschnittenen Röhrchen zur Winkelmessung auf. Im Bild 11 sind zeitgemittelte Ergebnisse über dem Statorwinkel aufgetragen. Für den Gesamtdruck und die Machzahl ist eine hervorragende Übereinstimmung zwischen zeitgemitteltem Kulite-Ergebnis und der p_0T_0 -Sonde zu beobachten. Das stationäre Ergebnis der Kulitesonde weicht etwas ab, dies ist jedoch auf die um etwa 1,6 mm verschobene radiale Position des stationären Pitotröhrchens zurück zu führen. Der ermittelte Strömungswinkel der p_0T_0 -Sonde weicht überall um etwa 3° von der Kulitesonde ab. Die Ursache ist unklar, doch könnte zum Teil die bisher generell noch ungenaue Nullausrichtung der Sonden im RGG dazu beitragen.

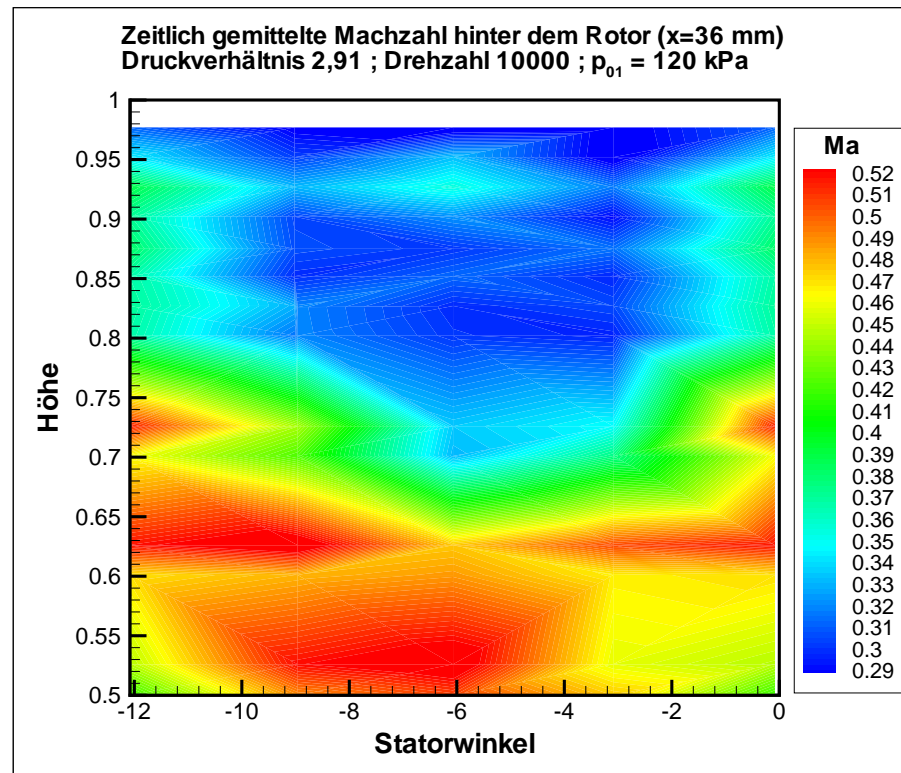


Bild 12: Stationäre Abström-Machzahl des Rotors, aufgetragen über dem Statorwinkel

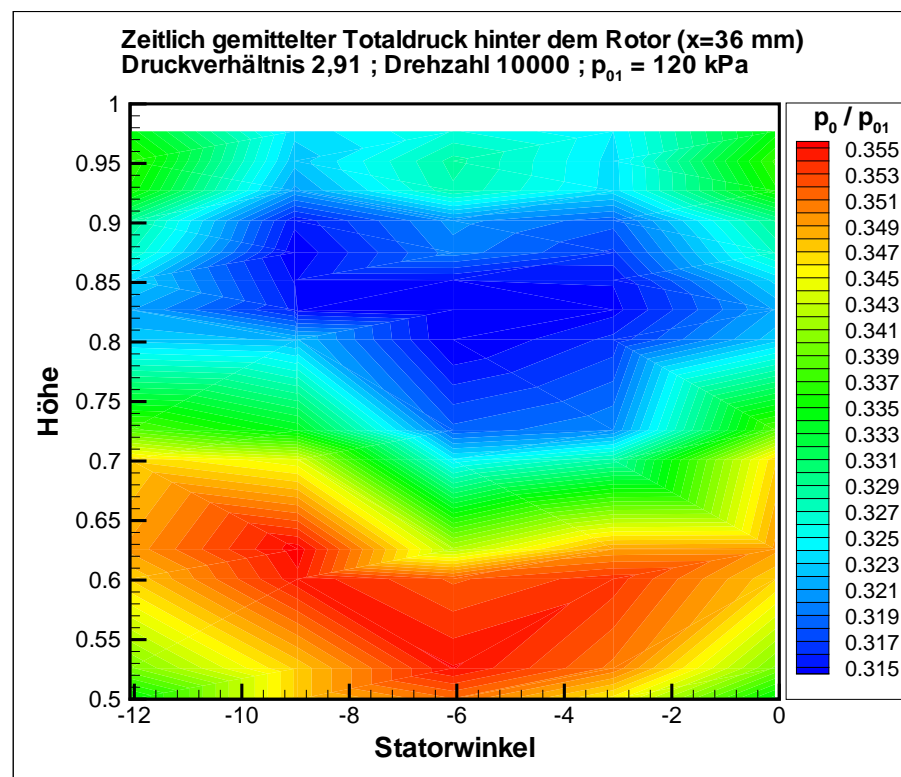


Bild 13: Stationärer Abström-Gesamtdruck des Rotors, aufgetragen über dem Statorwinkel

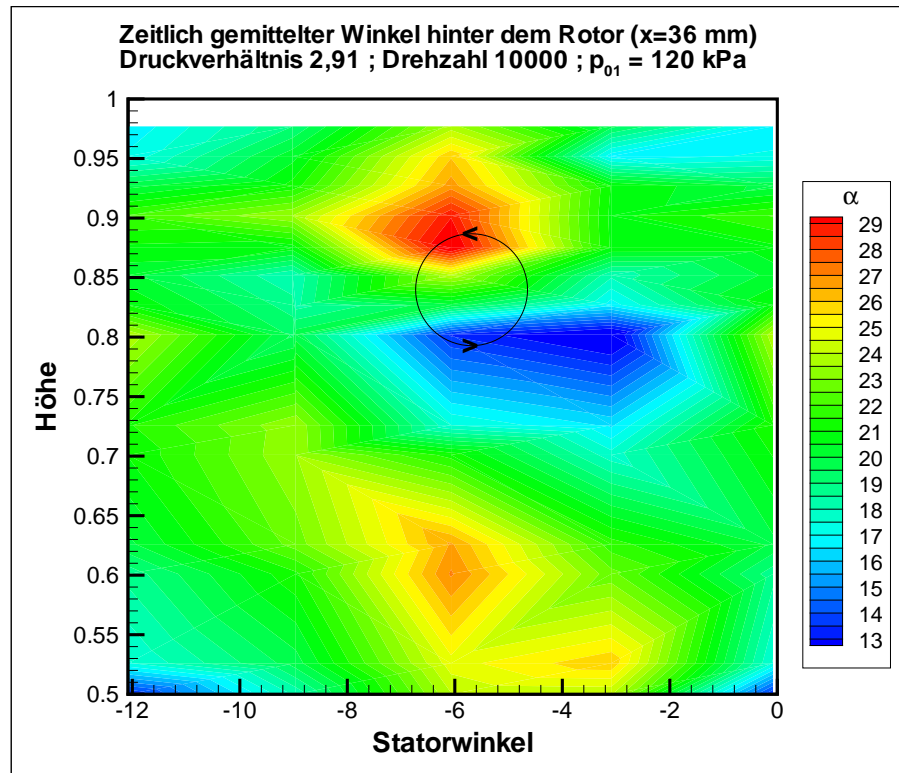


Bild 14: Stationärer Abströmwinkel des Rotors, aufgetragen über dem Statorwinkel, zusätzlich eingezeichnet ist die ungefähre Lage des Stator-Passagenwirbels

In den Bildern 12 bis 14 sind stationäre Abströmgrößen des Rotors, gemessen mit der Kulitesonde, dargestellt. Die Messungen bei 8 verschiedenen Radien erstreckten sich nicht über die gesamte Schaufelhöhe, sondern jeweils vom Mittelschnitt bis zu 97,7%. Den Bildern liegen sowohl die stationären Ergebnisse der Sonde, als auch die zeitgemittelten instationären Ergebnisse zu Grunde, da beide nach Bild 10 in etwa übereinstimmen. Allerdings muss bemerkt werden, dass die Konturplots aus Messungen bei nur vier Statorwinkeln unter Ausnutzung der Periodizität (Ergebnisse bei Statorwinkel 0° = Ergebnisse bei Statorwinkel -12°) angefertigt wurden. Trotzdem kann man in der Abbildung des stationären Strömungswinkels gut den Passagenwirbel des Stators erkennen (Bild 14).

Während in den vorherigen Konturplots die über die Rotorteilung gemittelten Werte, als Funktion von Statorstellung und Schaufelhöhe gezeigt wurden, sind im folgenden die mit dem zeitauflösenden Kulitesensor ermittelten Größen dargestellt, die allerdings über alle Statorstellungen gemittelt wurden. Die Bilder 15 bis 19 zeigen die instationären Abströmgrößen des Rotors, gemittelt über die 4 gleichverteilten Statorwinkel 0° , -3° , -6° , -9° . In den Konturplots ist jeweils eine Strömungsgröße über der Rotorteilung und der Schaufelhöhe aufgetragen.

Es ist schwierig die so aufgetragenen Messergebnisse zu interpretieren. Beispielsweise die Lage des Rotornachlaufs ist aus den Konturplots der Absolutgrößen schwer zu ermitteln. Gemäß den zusätzlich ermittelten Konturplots der rotorfesten Relativgrößen scheint der Rotornachlauf, zumindest für Schaufelhöhen zwischen 50% und 80%, im Bereich $\phi/t = 0$ bis $0,2$, bzw. $\phi/t = 1$ bis $1,2$ zu liegen. Die zur Umrechnung vom Absolut- ins Relativsystem zusätzlich benötigte Temperatur wurde der gleichzeitigen Messung mit einer etwas stromab installierten stationären p_0T_0 -Sonde entnommen.

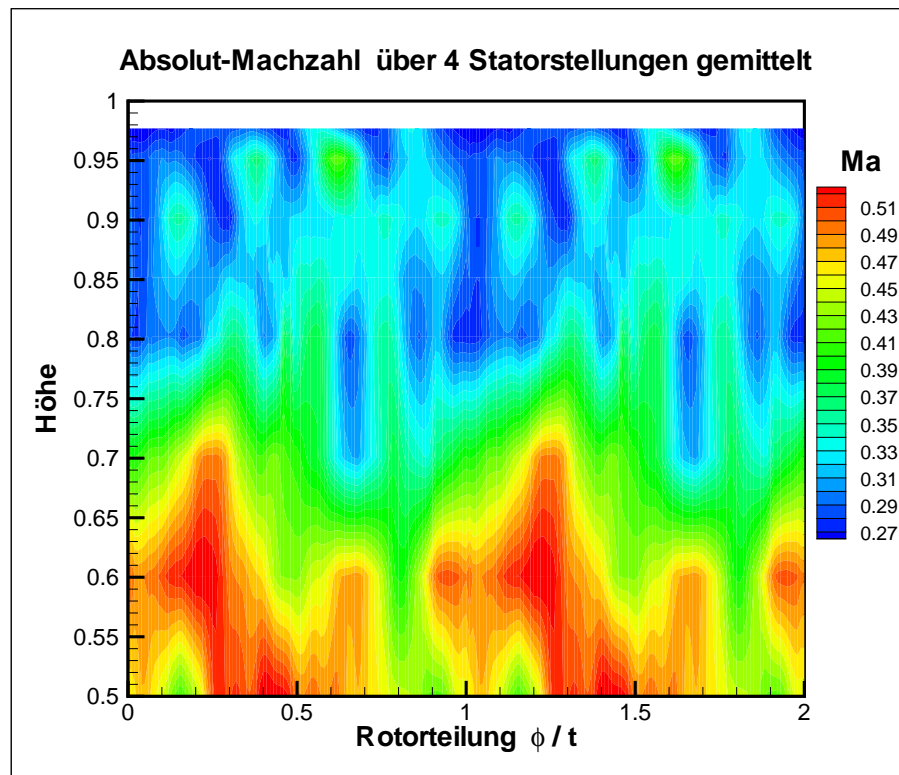


Bild 15: Instationäre Abström-Machzahl (Absolutsystem) des Rotors, aufgetragen über der Rotorteilung

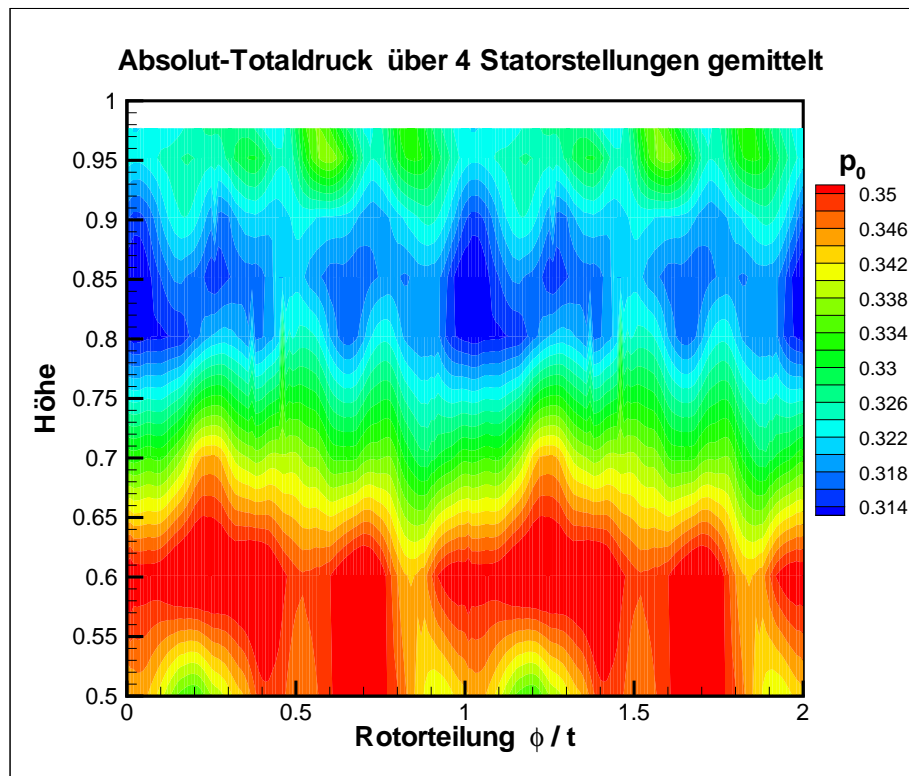


Bild 16: Instationärer Abström-Gesamtdruck (Absolutsystem) des Rotors, aufgetragen über der Rotorteilung

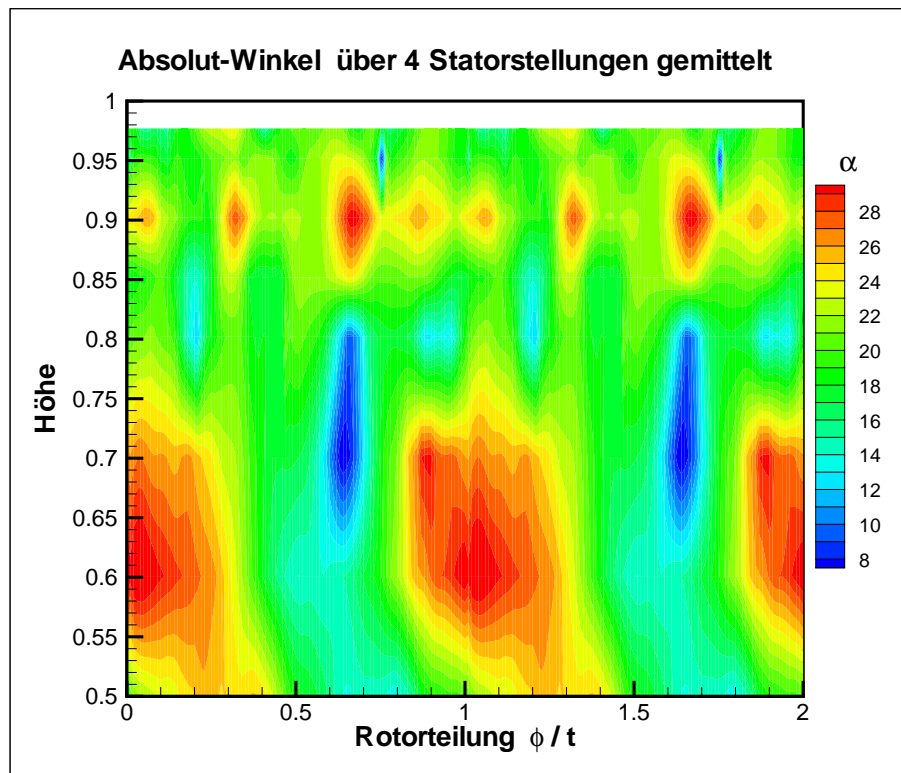


Bild 17: Instationärer Abströmwinkel (Absolutsystem) des Rotors, aufgetragen über der Rotorteilung

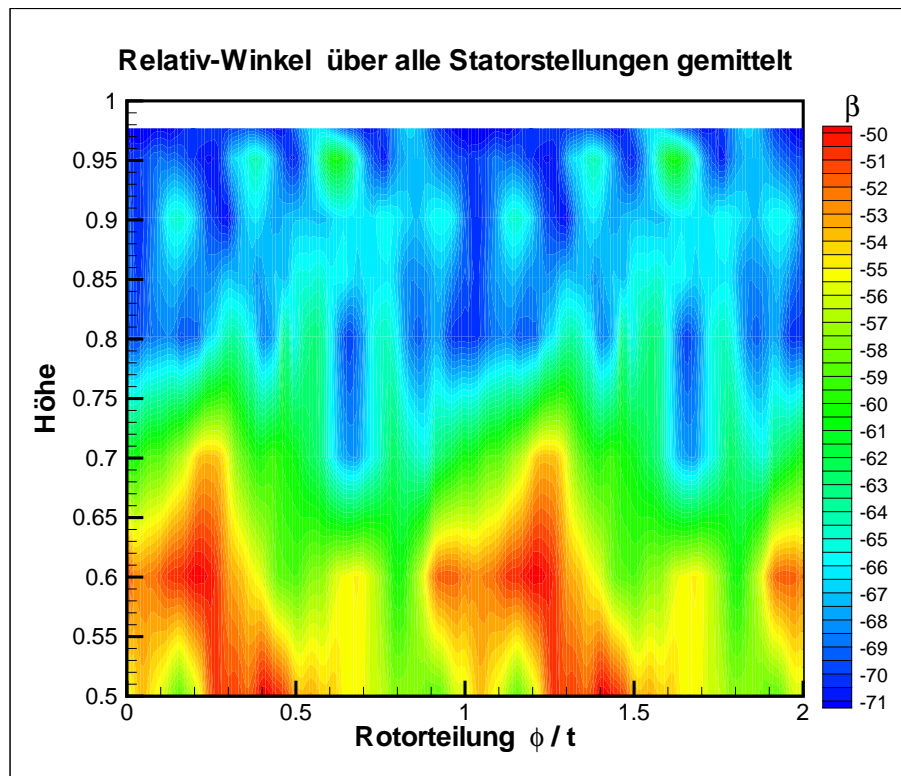


Bild 18: Instationärer Abströmwinkel (Relativsystem) des Rotors, aufgetragen über der Rotorteilung

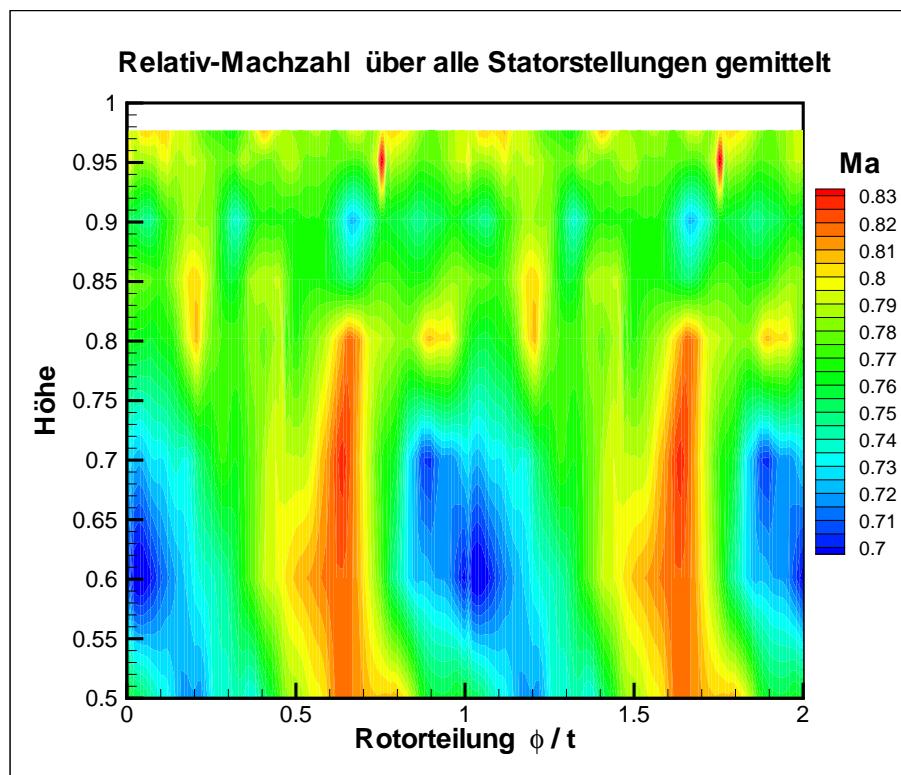


Bild 19: Instationäre Abström-Machzahl (Relativsystem) des Rotors, aufgetragen über der Rotorteilung

6. Zusammenfassung

Eine kombinierte Gesamtdrucksonde, welche die gleichzeitige Messung des stationären und des zeitabhängigen Pitotdrucks, mit Hilfe eines Kulitesensors, erlaubt, wurde im Sondenreichkanal (SEG) beim Vorkammerdruck $p_{01} = 35 \text{ kPa}$ im Machzahlbereich von 0,2 bis 0,9 und im Winkelbereich von -46° bis $+46^\circ$ kalibriert. Die sich ergebenden Drücke wurden als Druckbeiwerte bei konstanter Machzahl über dem Winkel aufgetragen und mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square-Fit) mit Polynomen approximiert. Die Koeffizienten der Druckbeiwert-Polynome wurden ihrerseits mit Polynomen über der Machzahl approximiert.

Der Zweck dieser Eichung zielte darauf hin, die Kulitesonde nicht nur zur Totaldruckmessung, sondern auch zur Winkel- und Machzahlbestimmung im RGG stromab eines Rotors einzusetzen. Zu diesem Zweck wurde weiterhin eine Auswerteprozedur erstellt, die es erlaubt, iterativ aus gemessenen Sondendrücken bei drei Sondenwinkeln die relevanten 2D-Strömungsgrößen, Machzahl, Winkel und Gesamtdruck, auch instationär, zu erhalten.

Die Kulitesonde wurde im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne im Windkanal für Rotierende Gitter (RGG) im Abströmfeld des Rotors einer Hochdruckturbinenstufe eingesetzt. Dabei konnten die zeitgemittelten Ergebnisse der Kulitesonde auch mit den Ergebnissen einer 3-Lochsonde verglichen werden, wobei eine gute Übereinstimmung festgestellt wurde. Die Sonde erreicht eine räumliche (und zeitliche) Auflösung von etwa 11 Punkten pro Rotorteilung.

Aus der Rückrechnung der Eichung und den Erfahrungen beim Einsatz der Sonde im RGG kann man folgende Schlüsse bezüglich der Messgenauigkeit ziehen:

- Wenn die drei Messpunkte den Strömungswinkel großzügig einschließen und dabei einen gegenseitigen Abstand von mindestens 60° aufweisen, dann kann sowohl stationär als auch instationär, die Machzahl absolut auf $\pm 0,03$ bestimmt werden, der stationäre Totaldruck kann mit einer relativen Genauigkeit von 0,2% bestimmt werden und der Totaldruck am Kulitesensor mit einer relativen Genauigkeit von etwa 0,3%.
- Der Strömungswinkel könnte auf $\pm 1^\circ$ bestimmt werden, wenn man den Einbaufehler, d.h. die Nullstellung des Winkels der Sonde auf Null reduzieren könnte. Zur Zeit ist allerdings noch ein Einbaufehler von etwa 1° vorhanden, der in Zukunft durch den Einsatz eines Spiegels am Sondenschaft und eines Autokollimators auf weniger als $0,4^\circ$ reduziert werden soll.

Für die 2005 durchgeführten Messungen im Bereich von $p_0 = 30$ bis 40 kPa ist die vorliegende Eichung gut geeignet, will man aber zukünftig die Sonde bei Totaldrücken weit darüber einsetzen, so sollte man eine zusätzliche Eichung speziell im geplanten Gesamtdruckbereich vornehmen.

Literatur

- [1] Rehder, H.-J., Kost, F., Kessar, A.:
Low Engine Order Stage Tests at DLR (Time-Averaged Results)
DLR-interner Bericht IB 225-2005 A 02, Göttingen, 2005
- [2] Kost, F.:
Eichung einer Kulite-Pitotsonde und Beschreibung der Auswerteprozedur
DLR-interner Bericht IB 225-2005 A 03, Göttingen, 2005
- [3] Gieß, P.-A., Rehder, H.-J., Kost, F.:
A New Test Facility for Probe Calibration Offering Independent Variation of Mach and Reynolds Number
Proceedings of the 15th Symposium on "Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines", Firenze, Italy, September 21-22, 2000
- [4] Muller, J.-S.:
Kalibration einer Einlochzylindersonde im Unterschallbereich
DLR-interner Bericht IB 225-2001 A 01, Göttingen, 2001
- [5] Sieverding, C.H., Arts, T., Dénos, R.:
Annular Cascade Tests
Advances in Engines Technology, J. Wiley & Sons, R. Dunker, eds., 1995
- [6] Stoer, J.:
Einführung in die Numerische Mathematik I
Heidelberger Taschenbücher Band 105, Springer-Verlag, Heidelberg, 1972
- [7] Kost, F., Gieß, P.-A.:
Experimental Turbine Research at DLR Goettingen
Journal of the Gas Turbine Society of Japan, Vol. 32, No. 6, Nov. 2004
- [8] Kost, F.:
A combined pressure, temperature probe for measurements in the Rotating Cascade Tunnel (RGG)
DLR internal report IB 225-2006 A 04, Göttingen, 2006

Abbildungsverzeichnis

1	Aufbau der neuen Kulitesonde 1 (Juli 2005)	2
2	Frequenzanalyse einer Kulitemessung	3
3	Beispiel einer statischen Eichung des Drucksensors im Kulite	5
4	Ein Ergebnis der Sondeneichung bei $Ma = 0,50$	6
5	Druckbeiwert des stationären Pitotrohrs bei verschiedenen Machzahlen . .	8
6	Druckbeiwert des Kulites bei verschiedenen Machzahlen	8
7	Turbinenstufe mit eingezeichneter Sonden-Messebene	12
8	Mit dem Kulite gemessener Druck über 10 Teilungen aufgetragen	13
9	Vergleich zweier Messergebnisse beim gleichen Strömungszustand	14
10	Vergleich stationärer Ergebnisse mit zeitgemittelten	16
11	Vergleich der Messergebnisse von Kulitesonde und der stationären p_0T_0 -Sonde	17
12	Stationäre Abström-Machzahl des Rotors, aufgetragen über dem Statorwinkel	18
13	Stationärer Abström-Gesamtdruck des Rotors, aufgetragen über dem Statorwinkel	18
14	Stationärer Abströmwinkel des Rotors, aufgetragen über dem Statorwinkel	19
15	Instationäre Abström-Machzahl (Absolutsystem) des Rotors	20
16	Instationärer Abström-Gesamtdruck (Absolutsystem) des Rotors	21
17	Instationärer Abströmwinkel (Absolutsystem) des Rotors	21
18	Instationärer Abströmwinkel (Relativsystem) des Rotors	22
19	Instationäre Abström-Machzahl (Relativsystem) des Rotors	22

Tabellenverzeichnis

1	Polynomkoeffizienten des stationären Pitotdrucks p_{0s}	9
2	Polynomkoeffizienten des Kulitedrucks p_{kul}	9